

油罐区储罐底板腐蚀成因及防护施工技术研究

吴宙颖

中国石化海南炼化化工有限公司 海南 儋州 571700

摘 要: 油罐区储罐底板作为储存介质与地基基础直接接触的关键部位,其腐蚀失效问题长期困扰着石油化工行业的安全生产。储罐底板腐蚀具有隐蔽性强、破坏性大、检测困难等显著特征,一旦发生严重腐蚀穿孔,将导致油品泄漏、环境污染甚至火灾爆炸等重大事故。本文在系统分析储罐底板腐蚀环境特征的基础上,从电化学腐蚀、微生物腐蚀、杂散电流腐蚀及应力腐蚀等多个维度深入剖析了腐蚀成因机理,进而从材料选用、表面处理、涂层防护、阴极保护及复合防护体系等方面,系统论述了储罐底板的防护施工技术要点,以为油罐区储罐底板腐蚀控制工程提供理论依据与技术参考。

关键词: 油罐区; 储罐底板; 腐蚀成因; 防护涂层; 阴极保护; 施工技术

引言

储罐是石油化工行业不可或缺的基础设施,其安全运行直接关系到能源供应的稳定性和周边环境的安全性。在储罐的各个结构部位中,底板长期处于最恶劣的腐蚀环境之中——底板外侧与地基基础接触,受土壤、地下水及杂散电流的影响;底板内侧则直接接触储存介质及沉积于底部的积水、杂质和腐蚀性沉积物。这种双侧暴露于腐蚀介质的结构特点,使得储罐底板成为整个储罐系统中腐蚀最为严重、失效风险最高的薄弱环节。更为棘手的是,底板腐蚀发生于储罐底部,难以在日常巡检中被及时发现,往往直到发生泄漏事故后才引起重视,此时已造成不可挽回的损失。因此,深入认识储罐底板的腐蚀成因机理,并据此采取科学有效的防护施工措施,对于保障储罐长周期安全运行具有重要的工程实践意义。近年来,随着我国石油战略储备规模的持续扩大和在役储罐老龄化问题的日益突出,储罐底板腐蚀防护问题受到越来越广泛的关注。

1 储罐底板腐蚀环境与特征分析

1.1 底板双侧腐蚀环境

储罐底板所处的腐蚀环境具有明显的双侧差异性特征。底板外侧(罐底与基础接触面)长期处于密闭的潮湿环境中,地基土壤中的水分、可溶性盐类及酸性物质构成了电解质溶液体系,加之土壤孔隙率、含水量、电阻率等因素的综合影响,形成了典型的土壤腐蚀环境。对于采用砂垫层基础的大型储罐,砂层中往往含有一定量的水分和溶解盐,其腐蚀性虽低于黏性土壤,但透水性较强,反而有利于腐蚀介质的持续补给。底板内

侧(罐内底部)的腐蚀环境则与储存介质的性质密切相关^[1]。原油储罐底部通常沉积有相当厚度的含盐水层和泥沙杂质,这些沉积物中的氯化物、硫化物及有机酸等腐蚀性组分浓度远高于上部油相,形成了独立的腐蚀微环境。成品油储罐虽沉积物较少,但罐底死区积水同样会因溶解氧浓度差异而形成氧浓差电池。此外,储罐在收发油作业过程中液位频繁变化,底板承受交变载荷,可能加速腐蚀疲劳进程。

1.2 储罐底板腐蚀的隐蔽性与危害性

储罐底板腐蚀具有显著的隐蔽性特征。底板位于储罐最底部,内外侧均无法直接目视检查,常规的外观巡检难以发现腐蚀迹象。即使在开罐检修期间,底板表面往往覆盖有厚重的油泥沉积物,彻底清理后方能暴露真实状况。这种“看不见的腐蚀”使得腐蚀损伤能够在不被察觉的情况下持续发展直至穿孔泄漏。从危害性角度而言,储罐底板一旦发生腐蚀穿孔,不仅直接造成油品损失和环境污染,更可能因泄漏油气积聚而引发火灾爆炸事故,后果不堪设想。而且,由于底板腐蚀通常呈现局部点蚀形态,穿孔前兆不易捕捉,突发性强,进一步放大了其安全风险。

2 储罐底板腐蚀成因机理

2.1 电化学腐蚀

电化学腐蚀是储罐底板最主要的腐蚀形式,其本质是金属表面不同区域之间存在电位差,在电解质溶液作用下形成腐蚀原电池。底板表面的电化学不均匀性可能源于材料本身的成分偏析、晶界析出、夹杂物分布不均等冶金因素,也可能源于底板不同部位的氧浓度差异、

介质浓度差异等环境因素。在底板外侧，罐底与基础接触面的氧浓度分布极不均匀——边缘区域因与大气相通而氧浓度较高，中心区域则处于相对缺氧状态，这种氧浓差梯度驱动着宏电池腐蚀的发生，使罐底边缘往往成为阳极区而加速腐蚀。与此同时，罐基础土壤中可溶性盐类的存在显著降低了土壤电阻率，增强了电化学腐蚀过程的离子传输效率。在底板内侧，罐底沉积物下方的金属表面因氧供应受阻而成为阳极，沉积物周边富氧区域成为阴极，形成典型的氧浓差电池，导致沉积物覆盖区域发生严重的局部点蚀。

2.2 微生物腐蚀

微生物腐蚀是储罐底板腐蚀中不可忽视的重要机制，其中硫酸盐还原菌（SRB）是最具破坏性的功能微生物。SRB 在厌氧条件下利用硫酸盐作为电子受体，代谢过程中产生硫化氢，对钢铁表面形成强烈的腐蚀性攻击。储罐底板内侧的油泥沉积层下方和底板外侧的潮湿土壤基础环境中，均具备 SRB 生长繁殖所需的厌氧条件和硫酸盐营养源，是微生物腐蚀的高发区域。SRB 参与下的腐蚀过程往往与电化学腐蚀相互耦合、协同促进^[2]。微生物膜在金属表面形成的生物膜结构改变了界面区域的物质传输和电化学特性，生物膜下方的局部环境酸化进一步加速了阳极溶解过程。微生物腐蚀的典型特征是腐蚀产物呈黑色硫化亚铁，伴有明显的恶臭气味，腐蚀形态多呈现深坑状或蜂窝状。

2.3 杂散电流腐蚀

随着油罐区内各类电气化设施的增加和埋地金属结构的密集布置，杂散电流对储罐底板的腐蚀影响日益凸显。杂散电流主要来源于阴极保护系统的电流泄漏、直流输电线路的接地电流以及电气化铁路的牵引电流等。当杂散电流进入储罐底板金属结构后，在电流流出部位会发生强烈的阳极溶解反应，其腐蚀速率可比自然腐蚀高出数倍甚至数十倍。储罐底板作为大面积埋地金属结构，与周围土壤介质形成良好的电性接触，杂散电流极易经由罐基础导入底板。尤其是在多台储罐相邻布置的大型罐区，各储罐之间的电位差异可能导致罐组间产生直流杂散电流耦合，加剧个别储罐底板的腐蚀进程。

2.4 其他腐蚀因素

除上述主要腐蚀机制外，储罐底板还受到应力腐蚀开裂和腐蚀疲劳的威胁。大型储罐在充水高度变化过程中，底板承受着复杂的应力分布，焊接残余应力、结构拘束应力与工作应力的叠加，在腐蚀介质的协同作用下可能诱发应力腐蚀开裂。焊接接头区域由于存在热影响

组织、焊接缺陷及残余应力，对应力腐蚀的敏感性尤为突出。此外，储罐运行中的液位循环变化使底板承受交变应力，在腐蚀环境配合下可能发生腐蚀疲劳，降低底板的使用寿命。

3 储罐底板防护施工技术

3.1 底板材料的选用与处理

储罐底板材料的合理选择是腐蚀控制的源头措施。对于一般腐蚀环境的储罐，选用低碳钢或低合金钢时需严格控制硫、磷等有害杂质含量，并关注钢板的非金属夹杂物等级，以减少微观电化学腐蚀的不均匀性。对于储存高含硫原油或在强腐蚀性地基上建设的储罐，可选用耐蚀性能更优的镍基合金复合板或不锈钢复合板，以显著提升底板的本质耐蚀能力。材料层面的另一个重要措施是焊接工艺的优化。底板焊缝是腐蚀优先发生的薄弱区域，应通过合理选择焊接方法、控制热输入量、采用多层多道焊等措施，改善焊缝及热影响区的组织形态，减少焊接缺陷和残余应力。焊后热处理可有效消除焊接残余应力，降低应力腐蚀开裂的风险。

3.2 底板表面预处理技术

表面预处理质量直接决定了防腐涂层体系的附着力和防护寿命，是防护施工中最为关键的环节之一。储罐底板表面预处理主要包括除油、除锈和表面粗糙度控制三个方面的内容。除油处理需彻底清除底板表面的油脂、污垢等污染物，否则将严重影响涂层与基体的结合强度。除锈作业通常采用喷砂清理方式，要求达到 Sa2.5 级以上的清理等级，即表面应呈现均匀的金属本色，无可见的油污、锈斑和氧化皮残留^[3]。值得强调的是，表面粗糙度的控制往往容易被忽视但至关重要。适度的表面粗糙度有利于涂层机械嵌合附着力的发挥，但粗糙度过大则会导致涂层在波谷处产生屏蔽缺陷，过小则附着力不足。对于储罐底板防腐涂装，通常要求表面粗糙度控制在 40~75 μm 范围内，具体数值应根据所选涂料类型和施工工艺确定。

3.3 防腐蚀涂层体系施工

储罐底板防腐蚀涂层体系的选择应综合考虑腐蚀介质的性质、温度条件、施工环境及设计寿命要求。目前应用较为成熟的涂层体系包括环氧煤沥青涂层、玻璃鳞片增强环氧涂层、聚氨酯涂层及新型石墨烯改性复合涂层等。其中，环氧煤沥青涂层以其优良的耐水性、耐阴极剥离性和相对经济的成本，在国内储罐底板防护中得到了最为广泛的应用；玻璃鳞片增强涂层则凭借鳞片状填料形成的“迷宫效应”，显著延长了腐蚀介质的

渗透路径,适用于腐蚀性更强的环境。涂层施工质量控制是确保防护效果的核心环节。施工环境温度宜控制在5~35℃之间,相对湿度不宜超过80%,且应避免在基体表面温度低于露点温度3℃以上时施工。每道涂层的干膜厚度应满足设计要求,通常底涂层、中间涂层和面涂层需配套使用,总干膜厚度不宜低于300μm,对于强腐蚀环境应进一步加厚。涂层间的复涂间隔时间需严格控制,既不能因时间过短导致溶剂滞留,也不能因时间过长造成层间附着不良。每道涂层施工后应进行干膜厚度检测和针孔检测,及时修补缺陷部位。

3.4 阴极保护系统施工

阴极保护是储罐底板电化学防护的重要手段,通常与涂层防护联合使用,形成“涂层+阴极保护”的协同防护体系。阴极保护施工分为牺牲阳极法和外加电流法两种技术路线,实际工程中应根据储罐规模、基础结构和经济性进行综合比选。牺牲阳极法具有系统简单、无需外部电源、对邻近构筑物干扰小等优点,适用于中小型储罐。施工时需将镁阳极、锌阳极或铝阳极按照设计布置方案埋设在罐基础中或安装于底板内侧,并确保阳极与底板之间的电气连接可靠、导线绝缘良好。阳极埋设位置和数量的确定需考虑土壤电阻率分布和阳极的有效保护半径。外加电流法适用于大型储罐群体防护,其施工内容包括辅助阳极地床的敷设、恒电位仪的安装和参比电极的埋设^[4]。辅助阳极通常采用高硅铸铁或混合金属氧化物阳极,埋设于罐基础周围或罐底下方。参比电极用于监测罐底电位,确保其处于保护电位范围之内(通常为-0.85V至-1.15V,相对于铜/硫酸铜参比电极)。施工完成后须进行充分的调试,确保各储罐的电位分布均匀且不存在过保护或欠保护问题。

3.5 复合防护体系施工与质量控制

“优质涂层+阴极保护”的复合防护体系已成为大型储罐底板防腐的主流技术方案,其综合效果远优于单一防护措施。在该体系中,涂层承担主要的屏障隔离功能,大幅降低了阴极保护所需的电流密度;阴极保护则弥补了涂层不可避免的微观缺陷和局部破损区域,两者相辅相成。施工中需特别注意涂层与阴极保护的相容性问题——某些涂层体系在阴极极化条件下可能发生阴

极剥离,因此须选用具有良好抗阴极剥离性能的配套涂料。施工质量控制应贯穿从材料进场检验、施工过程监控到最终验收的全过程。底板焊缝和边缘板是腐蚀的优先发起部位,应在常规防护基础上采取加强措施,如增加涂层次数和厚度、贴衬玻璃丝布增强、或采用可熔性塑料密封边缘间隙等。储罐充水试验后的涂层修复同样是容易被忽视但不容遗漏的施工环节。施工过程中的每道工序均应形成可追溯的质量记录,为日后维护检修提供依据。

4 结语

油罐区储罐底板腐蚀是一个涉及电化学、微生物学、材料科学和施工技术等多学科交叉的复杂问题。本文从腐蚀环境和成因机理出发,系统阐释了电化学腐蚀、微生物腐蚀、杂散电流腐蚀及应力腐蚀等在储罐底板上的作用机制,并据此论述了涵盖材料选用、表面处理、涂层施工、阴极保护及复合防护体系的系统性防护施工技术要点。当前我国大量在役储罐已进入老龄化阶段,底板腐蚀问题将更加突出。未来储罐底板防护技术的发展趋势将聚焦于高性能长寿命涂料的开发应用、智能化阴极保护系统的推广以及全寿命周期管理理念的深入贯彻。与此同时,加强施工环节的标准化和精细化管理,确保各项防护技术措施落实到位,同样是提升储罐底板防护质量的关键所在。唯有在深入认知腐蚀机理的基础上,将材料创新、技术升级和施工质量管控有机结合,方能有效遏制储罐底板腐蚀问题,保障油罐区的本质安全。

参考文献

- [1] 王浩然,陈建民,刘志强.大型原油储罐底板腐蚀机理及防护措施研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2023,35(4):412-418.
- [2] 张伟,李明哲,赵庆凯.储罐底板阴极保护电位分布数值模拟与优化设计[J].石油化工设备技术,2022,43(2):25-30.
- [3] 刘国强,孙玉宝,周明.环氧玻璃鳞片涂层在储罐防腐工程中的应用研究[J].涂料工业,2024,54(1):56-62.
- [4] 陈思远,黄海峰.硫酸盐还原菌对储罐底板的腐蚀影响及防控技术综述[J].表面技术,2023,52(7):198-207.